深圳产业光源单束团不稳定性研究

冀锐敏[1] 林椿涛[1] 何涛[1] 徐小林[1] 刘桂民[1]
1（深圳综合粒子设施研究院　深圳　518107）

摘要　深圳产业光源(SILF)作为第四代光源，设计使用半径 12 mm 的真空盒以及间隙低至 4 mm 的大量插入件，显著增加了全环阻抗。由于超低横向发射度与小动量压缩因子设计，束流集体效应成为限制机器性能的主要因素之一。因此，SILF 拟采用三次超导谐波腔（3HC）来拉伸束团长度、抑制不稳定性和提升束流阈值。本文基于 SILF 储存环磁聚焦结构与阻抗模型，通过单束团不稳定性研究，分析了有/无谐波腔的差异，对比了主动式/被动式谐波腔的功效。结果表明，三次谐波腔可大幅提升单束团电量阈值，有利于实现多种运行模式；主动式/被动式超导谐波腔对应的单束团电量阈值差别较小；现阻抗条件下单束团电量阈值满足 300 mA 设计需求。

关键词　低发射度储存环；阻抗；单束团不稳定性；谐波腔
中图分类号　TL99

Single Bunch Instability Analysis Based on SILF Design

JI Ruimin[1]　LIN Chuntao[1]　HE Tao[1]　XU Xiaolin[1]　LIU Guimin[1]
1(*Institute of Advanced Science Facilities, Shenzhen 518107, China)*

Abstract　**[Background]**: Shenzhen Innovation Light Source Facility (SILF) is a 4th generation light source currently underway in Shenzhen China. The circumference of the storage ring is about 700 m, the average beam current is 300 mA，the natural emittance is about 90 pm·rad. Due to the narrow aperture vacuum chamber (the radius is 12 mm) used to accommodate the high field-gradient magnets and the small-gap insertion devices (the minimum gap is 4 mm), the beam-coupling impedance in SILF storage ring is very high. With the low natural emittance and low momentum compaction factor, SILF is intrinsically more sensitive to impedance-driven collective effects. **[Purpose]**: To suppress the beam instabilities and increase the threshold current, a 3rd harmonic cavity (3HC) is under consideration. Based on the single-bunch instabilities, this paper focuses on the impact of 3HC and the effect of active / passive 3HC. **[Methods]**: The broadband impedance was represented by resistive-wall and the geometric parts modeled and analyzed by ECHO and CST respectively. The instabilities were evaluated based on macro-particle simulation by ELEGANT. Three different scenarios were analyzed, no 3HC, active 3HC and passive 3HC. The investigation of the first two scenarios was applied with single bunch using the optimum voltage and phase configurations at zero current. For the last scenario, multi-bunches with uniform gaps and 5 - 20 % filling rate were used to conserve the low current (about 30∽60 mA). It was accomplished by two steps. Firstly, the passive 3HC was detuned to achieve the desired bunch-lengthening factor (~4). Secondly, the impedance was included with the same detuning. **[Results]**: The results show that both 3HCs can suppress microwave instabilities greatly, increase TMCI threshold remarkedly with positive chromaticity; when chromaticity is +3, the threshold is 2.5 nC and 2.4 nC for active and passive 3HC respectively; without 3HC, the threshold maintains 1.0 nC when chromaticity is larger than +1; the single bunch charge thresholds satisfy 300 mA requirement for all. **[Conclusions]**: 3HC is necessary for varied operation modes in SILF. The efficiency difference for active and passive 3HC is nearly negligible referring to the single bunch threshold.

第一作者：冀锐敏，女，1984 年出生，2018 年于中国科学院大学获博士学位，研究领域为加速器物理
通讯作者：刘桂民，E-mail: liugm@mail.iasf.ac.cn
收稿日期：20XX-00-00，修回日期：20XX-00-00

Key words Ultra-low emittance storage ring; Impedance; Single bunch instability; High order harmonic cavity

衍射极限储存环具有更低束流发射度（0.01 ~ 0.3 nm·rad）、更高亮度和更高的横向相干性等特点，是第四代同步辐射光源发展的一个重要方向[1]。相比于第三代同步辐射光源，衍射极限储存环需要强聚焦磁铁来实现低发射度，大大限制了储存环真空盒的尺寸，并且采用了大量小间隙插入件，导致全环阻抗明显增加；横向发射度的降低和更小的动量压缩因子使得束流对集体效应更加敏感[2,3]。为达到更好的束流品质，衍射极限储存环通常都采用高次谐波腔配合基频腔进行束团拉伸。如北京高能同步辐射光源（HEPS）采用主动式三次谐波腔[3]，合肥先进光源（HALF）采用被动式三次谐波腔[4]，将束长拉伸约 6 倍，通过降低束团电子密度抑制束流集体效应，以达到更好的束流品质和机器性能。深圳产业光源（SILF）储存环[5]采用 Hybrid-7BA 磁聚焦结构，自然发射度约 90 pm·rad，直线节长度约 6 m。因此，SILF 将使用超导高频腔，但尚未从主动式和被动式三次超导谐波腔中做出最终选择。本文从单束团不稳定性方面评估其影响及差异。首先基于各系统元件设计方案，采用数值模拟程序 ECHO[6]和 CST[7]完成了各元件模型的建立和全环阻抗计算；利用 ELEGANT[8,9]程序在无谐波腔、主动式谐波腔和被动式谐波腔三种条件下进行束团拉伸、微波不稳定性、横向不稳定性的计算，分析几种情况下的单束团电量阈值差异，评估现方案是否可以满足 300 mA 设计与多种运行模式的需求。

1 SILF 储存环

SILF 储存环设计采用 Hybrid-7BA 磁聚焦结构，周长约 700 m，束流能量 3 GeV，总流强 300 mA，自然发射度约 90 pm·rad。SILF 储存环的关键参数见表 1，包含了插入件的影响。

表 1 SILF 储存环主要参数
Table 1 Key parameters of SILF storage ring

参数 Parameters	值 Values	单位 Units
能量 Beam energy	3.0	GeV
流强 Beam current	300	mA
自然发射度 Nature emittance	~90.0	pm·rad
工作点(Qx/Qy) Tunes	68.26/24.22	-
自然色品(x/y) Natural chromaticity	-114.86/-79.76	-
阻尼时间(x/y/s) Damping time	34.97/43.74/25.01	ms
动量压缩因子 Momentum compaction	6.6×10^{-5}	-
基频腔频率 Fundamental RF frequency	500	MHz
三次谐波腔频率 3rd RF frequency	1.5	GHz
单圈能量损失 Energy loss per turn	1.0	MeV
能散 Energy spread	1.0 ‰	-
自然束长 Natural RMS bunch length	2.5	mm
基频腔腔压 Fundamental RF voltage	2.4	MV

1.1 全环阻抗

储存环中非理想材料以及不光滑和不连续的结构均可产生阻抗。受阻抗影响，束流激发出的电磁场作用于自身，在束流电子密度很高的情况下可引起束流品质变差、不稳定性发生和元器件发热等问题[1-3]。储存环阻抗分为电阻壁阻抗和结构阻抗[10-12]。本文基于各系统的关键元器件设计方案进行了逐个建模与阻抗计算，包括基频腔、谐波腔、法兰、焊缝、波纹管、真空泵、BPM、注入磁铁、插入件、各类型过渡段等。SILF 储存环主体真空盒半径为 12 mm，采用内壁镀 1 μm 厚度 NEG 膜的铜真空盒。真空外插入件间隙 4-8 mm，同样采用内壁镀 NEG 膜的铜真空盒；真空内插入件间隙 2-3 mm，采用铜膜屏蔽。电阻壁阻抗采用 ECHO 1D 程序进行频域计算。轴对称结构与复杂几何结构的阻抗分别采用 ECHO 2D 与 CST 程序在时域中计算，激励束采用 RMS 束长为 1.5 mm 的高斯束，对应的截止频率约 70 GHz。

全环纵向阻抗和归一化横向阻抗[3,9]频谱如图 1 所示。纵向阻抗中的峰值由波纹管、BPM 和高频系统

产生。横向阻抗中的峰值由 BPM 和波纹管产生，低频部分主要贡献者为电阻壁和大量的 BPM。全环阻抗分析表明，总的纵向宽带阻抗约 110 mΩ，全环总寄生功率损失约为 176 V/pC，全环横向功率损失因子约为 37 kV/(pC·m)。

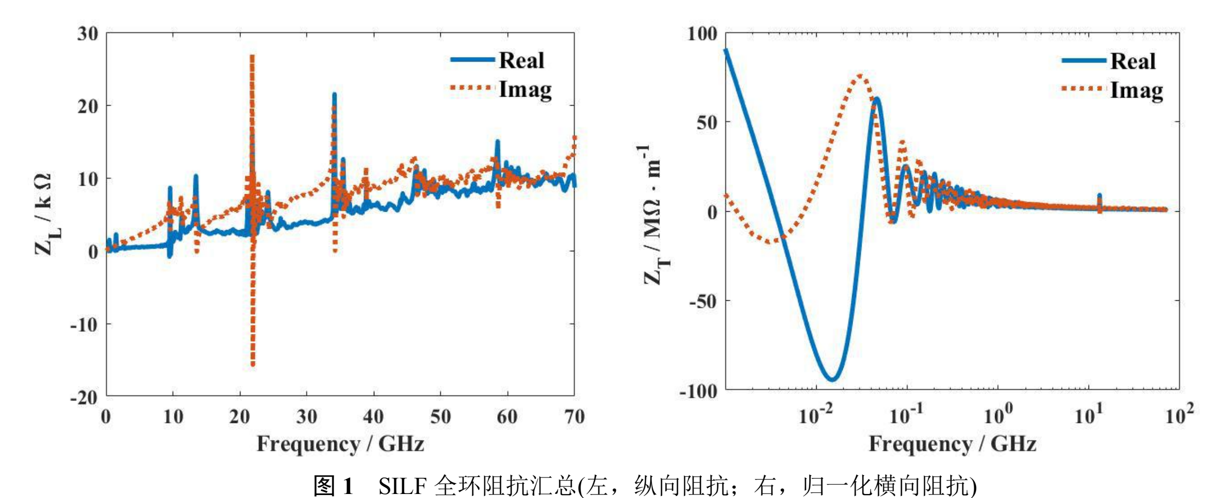


图 1　SILF 全环阻抗汇总(左，纵向阻抗；右，归一化横向阻抗)
Fig.1　Impedance budget of SILF storage ring. (left, longitudinal impedance; right, beta-weighted vertical impedance)

2　单束团不稳定性

单束团不稳定性包括束团拉伸效应、微波不稳定性和横向模式耦合不稳定性（简称横向不稳定性）等，与宽带阻抗相关[1-3]。其他光源的研究工作，如 HEPS[2,12]、MAX IV[13]、DIAMON-II[14]、ALS-U[15]等，均表明配合使用基频腔和高次谐波腔可拉伸束团长度，对单束团不稳定性有明显的抑制作用，既可以提升阈值，还可以明显降低不稳定阈值之上束团能散的增加速度。SILF 准备使用三次超导谐波腔进行束团拉伸，但采用主动式还是被动式仍在研究阶段，也是本工作研究任务之一。本章节中的计算使用 ELEGANT 程序完成。基频腔与主动式三次谐波腔情况下，模拟中使用 10^5 个宏粒子模拟单束团，跟踪 10 万圈，大于 5 个阻尼时间。被动式三次谐波腔 R/Q 值为 90，Q_0 为 2×10^8。基频腔与被动式三次谐波腔情况下，全环均匀填充 5%-20% 的束团，总流强水平较低(约 30∽60 mA)，每个束团使用 10^4 个宏粒子模拟，考虑到被动式谐波腔中平衡电磁场的建立，跟踪 20 万圈，大于 10 个阻尼时间。

2.1　三次谐波腔与束团拉伸

基频腔及主动式/被动式谐波腔的参数设置依据束团理想拉伸的条件，主动式和被动式谐波腔在 ELEGANT 模拟中分别采用了 RFCA 和 RFMODE 模式[14-16]。本节被动式谐波腔条件下，单束团电量 0.6 nC，束团填充率 10%，谐波腔失谐频率 5.14 kHz。无/主动式/被动式谐波腔条件下的束团分布如图 2 所示。在“零”流强条件下无纵向阻抗，束团达到理想拉伸，束团归一化分布见图 2 中的左侧图，RMS 束团长度分别为 2.5 / 11.9 / 12.0 mm，归一化的束团电子密度峰值分别为 5.0×10^{10} / 8.7×10^{9} / 1.1×10^{10} s^{-1}。主动式和被动式谐波腔都可以将束团长度拉伸超过 4 倍。无/主动式谐波腔情况下束团对称分布，被动式谐波腔拉伸后的束团峰值偏向尾部。加入纵向阻抗后束团分布情况见图 2 中的右侧图。相比于“零”流强条件，束团分布失去对称性，拉伸变差。无/主动式谐波腔情况下束团峰值偏向头部，被动式谐波腔拉伸后的束团峰值仍偏向尾部。无/主动式/被动式谐波腔三种情况下的 RMS 束长分别减小至 2.2 / 10.6 / 11.1 mm。归一化束团峰值密度均有明显的增加，分别增加至 9.5×10^{10} / 1.3×10^{10} / 1.5×10^{10} s^{-1}，束团峰值密度分别增加 90 / 50 / 35 %。

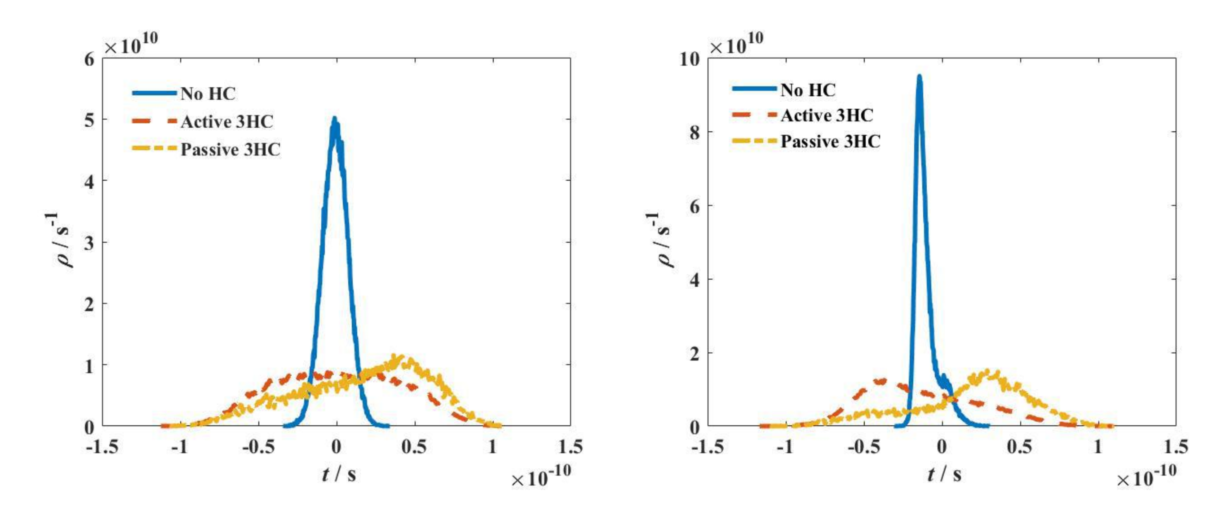


图 2 不同条件下的束团拉伸(左，单束团电量 0.6 nC, 无纵向阻抗；右，单束团电量 0.6 nC, 有纵向阻抗)
Fig.2 Bunch lengthening under different conditions. (left, 0.6 nC / bunch, w/o W_L; right, 0.6 nC / bunch, w/ W_L)

2.2 微波不稳定性

微波不稳定性是储存环中单束团不稳定性中重要的一种，由纵向阻抗引起，会造成束团长度变化与能散增加，不会导致束团中粒子丢失。无/主动式/被动式谐波腔条件下，束团长度与能散随单束团电量变化情况如图 3 中的左侧图和右侧图所示。由图可见，无谐波腔条件下，束团长度随电量的增加先减小后增加，在 1.30 nC 以内能散均保持 1.00 ‰，随后不稳定性发生，束团开始震荡，能散快速增加。增加主动式谐波腔后，发生束团拉伸效应，束团长度同样随电量的增加先减小后增加，1.10 nC 以内能散均保持 1.00 ‰，随后不稳定性发生，但能散增加速度远低于无谐波腔的情况。在被动式谐波腔计算中，首先调节失谐频率使束团拉伸长度与“零”流强下主动式谐波腔情况下的理想拉伸长度相当，见图 3 左侧图（Passive 3HC, w/o Z_L）；随后增加纵向阻抗，束团拉伸情况发生变化，见图 3 左侧图（Passive 3HC, w/ Z_L）。被动式谐波腔条件下，0.90 nC 以内能散均保持 1.00 ‰，随后不稳定性发生，在 0.90 – 2.0 nC 范围内能散增加速度超过主动式谐波腔条件，2.0 nC 以上能散增加速度与主动式谐波腔情况类似。考虑 300 mA 运行需求，均匀填充模式下单束团电量约 0.60 nC；80%填充率时单束团电量约 0.75 nC。因此，三种情况单束团微波不稳定性阈值均满足需求。

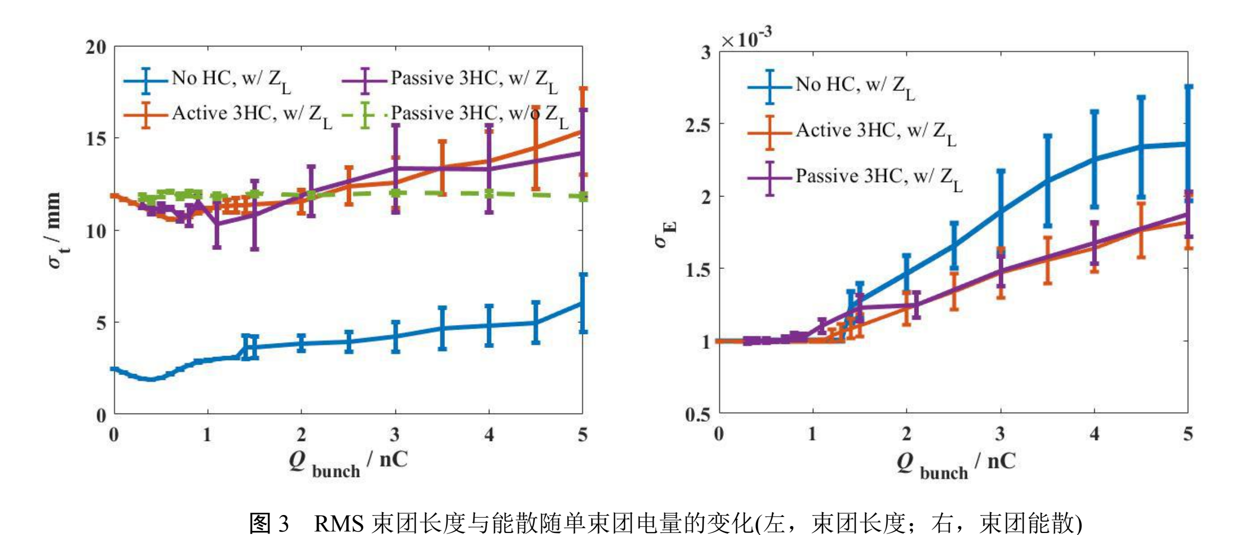


图 3 RMS 束团长度与能散随单束团电量的变化(左，束团长度；右，束团能散)

Fig. 3 The RMS bunch length and energy spread varying with single bunch charge(left, bunch length; right, energy spread)

2.3 横向单束团不稳定性

横向单束团不稳定性通常是储存环中单束团电量的限制因素。单束团电量增加至不稳定性发生时，束

团横向发射度会快速增长，甚至丢失束团中的粒子。计算横向单束团不稳定性时，加入了纵向阻抗和归一化横向阻抗，同时利用正色品来提高横向单束团不稳定性阈值。由于垂直方向比水平方向的阻抗更大，计算仅考虑了垂直方向的不稳定性。

SILF 横向单束团不稳定性计算结果如图 4 所示。1) 左上图，色品调整对三种情况下的单束团不稳定性阈值影响。无谐波腔条件下，将色品从 0 调整到+1 时单束团电量阈值从 0.37 nC 提升至 1.0 nC，继续增加色品后单束团电量阈值不再增加。色品为 0 条件下，加入主动式/被动式谐波腔后，束团长度有所增加，但由于纵向振荡频率的降低导致单束团电量阈值有所降低，约 0.14 nC。色品增加后，无论是主动式还是被动式谐波腔，单束团电量阈值均可继续增加。原因为谐波腔加入了朗道阻尼，色品校正后横向振荡频率随之分散，直至达到不稳定性阈值。色品调整到+3 时，主动式与被动式谐波腔两种情况对应的单束团阈值分别为 2.50 nC 和 2.40 nC，不仅满足 300 mA 的设计需求，而且支持多种束团填充模式。2) 右上图，无谐波腔、色品为 0 时的模式分析过程，可直观显示出该条件下单束团电量阈值为 0.37 nC。3) 左下图，主动式谐波腔、色品为 1 时的模式分析表明该条件下单束团电量阈值为 0.80 nC。4) 右下图，被动式谐波腔、色品为 1 条件下模式分析表明该条件下单束团电量阈值为 0.75 nC。

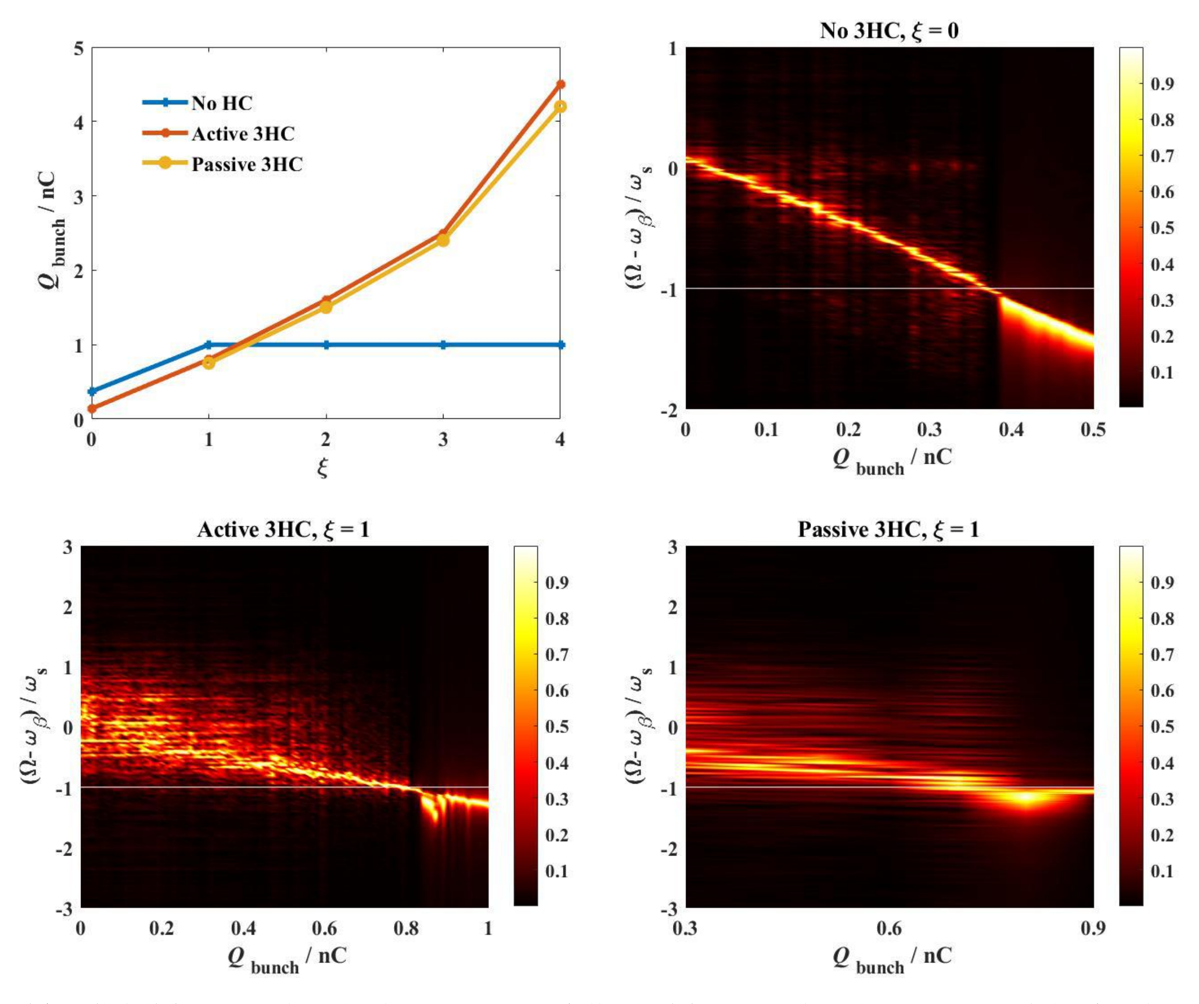


图 4 横向单束团不稳定性阈值分析 （左上，不同条件下的单束团不稳定性阈值；右上，无谐波腔、色品为 0 时的模式分析；左下，主动式谐波腔、色品为 1 时的模式分析；右下，被动式谐波腔、色品为 1 时的模式分析）

Fig. 4 Threshold of transverse single bunch instability(top left, single bunch threshold under varied conditions; top right, mode analysis w/o 3HC when ξ=0; bottom left, mode analysis w/ active 3HC when ξ=1; mode analysis w/ passive 3HC when ξ=1)

3 结语

本文基于 SILF 磁聚焦结构和真空等系统设计方案，对储存环中的主要元器件进行了建模与计算，得

到了全环耦合阻抗。基于该阻抗模型，针对无/主动式/被动式谐波腔三种情况下的单束团不稳定性进行了研究。结果表明，有/无谐波腔对单束团电量阈值有很大影响，主动式/被动式谐波腔对单束团电量阈值影响较小；纵向单束团不稳定性不会限制单束团流强阈值，但超过阈值后会影响束流品质；横向单束团不稳定性限制了单束团电量，需要引入正色品进行抑制来满足 300 mA 流强运行需求；现阻抗前提下，色品为+3、有谐波腔条件下单束团阈值电量大于 2.4 nC，满足设计需求；若运行模式中进一步对单束团电量提出更高需求，则部分元件如 BPM、波纹管等需开展优化。

作者贡献申明 冀锐敏负责模拟计算，文章起草与修订；刘桂民负责研究设计、理论指导与文章审阅；林椿涛参与部分内容计算与文章修订；何涛负责内容修订；徐小林负责计算软件及服务器的技术支持。

参考文献

1 焦毅,徐刚,陈森玉,等. 衍射极限储存环物理设计研究进展[J]. 强激光与粒子束，2015，27(04)：276-281. DOI:10.11884/HPLPB201527.045108

JIAO Yi, XU Gang, CHEN Senyu, et al. Advances in physical design of diffraction-limited storage ring [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2015, 27(04): 276-281. DOI:10.11884/HPLPB201527.045108

2 赵瑀,李志平,刘伟航,等.衍射极限储存环光源相关物理问题[J].科学通报,2020,65(24):2587-2600. DOI:10.1360/TB-2020-0165

ZHAO Yu, LI Zhiping, LIU Weihang, et al. Physics issues of the diffraction-limited storage ring light source[J]. Chinese Science Bulletin,2020, 65(24):2587-2600. DOI:10.1360/TB-2020-0165

3 王娜,徐海生,田赛克,等. 高能同步辐射光源中的耦合阻抗及束流集体效应研究[J]. 原子能科学技术,2019,53(09):1601-1606. DOI：10.7538/yzk.2019.youxian.0170

WANG Na, Xu Haisheng, TIAN Saike, et al. Studay of beam coupling impedance and beam collective effect in High Energy Photon Source[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2019,53(09): 1601-1606. DOI：10.7538/yzk.2019.youxian.0170

4 HE Tianlong, LI Weiwei, BAI Zhenhe, et al. Longitudinal equilibrium density distribution of arbitrary filled bunches in presence of a passive harmonic cavity and the short range Wakefield[J].Physical Review Accelerators and Beams, 2021,24,044401. DOI: https://doi.org/10.1103/PhysRevAccelBeams.24.044401

5 HE Tao, SUN Zhenbiao, ZHANG Tong, et al. Physics design of the Shenzhen innovation light source storage ring [J]. Journal of Instrumentation, 2023, 18, P05037. DOI: 10.1088/1748-0221/18/05/P05037

6 ZAGORODNOV I., WEILAND T. TE/TM field solver for particle beam simulations without numerical Cherenkov radiation[J]. Physical Review Accelerators and Beams, 2005,8 (4), 042001. DOI: https://doi.org/10.1103/PhysRevSTAB.8.042001

7 张敏．CST 微波工作室用户全书 [M].成都：电子科学技术大学出版社，2004.

8 M. Borland. Elegant: A flexible SDDS-Compliant code for accelerator simulation, LS-287 [R]. United States: Advanced Photon Source, 2000.

9 WANG Y, BORLAND M. Pelegant: A parallel accelerator simulation code for electron generation and tracking [C]. Proceedings of the 12th Advanced Accelerator Concepts Workshop, AIP Conf. Proc. 877, 241 (2006). https://doi.org/10.1063/1.2409141

10 WANG Dan, BANE Karl, Li DERUN, et al. Broadband impedance modeling and single bunch instabilities estimations of the Advanced Light Source Upgrade project [J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2022,1031,166524. https://doi.org/10.1016/j.nima.2022.166524

11 王猛,张文志,田顺强,等.中能衍射极限环中电阻壁和高频系统阻抗计算与优化[J].原子能科学技术,2022,56(09):1821-1831. DOI：10.7538/yzk.2022.youxian.0348

WANG Meng, ZHANG Wenzhi, TIAN ShunQiang, et al. Calculation and optimization of resistive wall and RD cavity impedance in medium energy diffraction limit storage ring [J]. Atomic Energy Science and Technology, 2022,56(09):1821-1831. DOI：10.7538/yzk.2022.youxian.0348

12 WANG Na, TIAN Saike, WANG Jiuqing. Impedance evaluation of masks in HEPS storage ring [C]// Proceedings of the 12th International Particle Accelerator Conference. Brazil, 2021: 3145-3148. doi:10.18429/JACoW-IPAC2021-WEPAB222

FIELDER Richard, CHAO Hungchun, WANG Siwei, et al. Single bunch instability studies with a new impedance database for

Diamond-II[C]// Proceedings of the 13th International Particle Accelerator Conference. Thailand, 2022: 2257-2260. DOI:10.18429/JACoW-IPAC2022-WEPOMS011

13 KLEIN M., NAGAOKA R. Study of collective beam instabilities for the MAX IV 3 GeV ring[C]//Proceeding of IPAC2013, China,2013:1730-1732

14 BOSCH R.A. Instability analysis of an active higher-harmonic cavity[C]// Particle Acceleration Meeting, Canada, 1997: 862-864. DOI:10.1109/PAC.1997.749862

15 PAN Zhilong, SANTIS S.D.,HELLERT T., et al. Beam-loading transients and bunch shape in the operation of passive harmonic cavities in the ALS-U[C]// Proceeding of IPAC2018, Canada,2018:3298-3300. DOI:10.18429/JACoW-IPAC2018-THPAK037

16 BORLAND M, BERENC T, LINDBERG R, et al. Tracking studies of a higher-harmonic bunch-lengthening cavity for the APS upgrade[C]// // Proceeding of IPAC2015, USA,2015:543-545. DOI:10.18429/JACoW-IPAC2015-MOPMA007